

擬塑性流体の小オリフィス流れの流量特性

Flow Characteristics of Small Orifice on Pseudo-Plastic Fluids

安藤 敏幸・原 絢子・石川 裕子

Toshiyuki ANDO, Ayako HARA and Yuko ISHIKAWA

(昭和59年11月27日受理)

1 ま え が き

近年、水、その他の **Newton** 流体ばかりでなく、非 **Newton** 流体を扱う応用分野も広く発展し、その流体力学的挙動も解明されてきているが、機構の複雑なこともあり、比較的単純な流れの現象が検討されている場合が多い。しかし、その一方で複雑な流れを扱わなければならないことも少なくない。こういった基礎的課題として、絞りの流動特性を把握することも重要であろう。

このような研究として単純な二次元拡大、縮小流れ⁽¹⁾、ポリマー絞り流動特性⁽²⁾がみられるものの擬塑性流体の絞りの **Reynolds** 数依存性については、実験的にはまだ十分明らかにされていないと思われる。

ここでは非 **Newton** 粘性をよく示し、濃度を変化させて擬塑性流体としての性質をとりうる **HEC** (ヒドロキシセルロース) 水溶液をとりあげて、試作した小口径管オリフィスを用い低 **Reynolds** 数の領域でのオリフィス流動特性を実験的に求め、2, 3 の知見を得たのでその詳細を報告する。

以下使用する記号を示す。

- C_a : 流量係数
- D : 剪断速度 ($\equiv \partial u / \partial x$)
- K, n : べき乗則の物質定数
- L : 流路の代表長さ
- P : 圧力
- ΔP : 圧力差
- U : 代表速度
- χ : 濃度 (重量)
- ρ : 密度
- τ : 層流剪断応力
- η : 粘度

2 計 算 式

べき乗則流体モデルが適用できる場合、層流剪断応力 τ は、剪断速度を D 、物質定数を K, n として

$$\tau = KD^n \dots\dots\dots(1)$$

で表現する。

ここで取りあげる **HEC** 水溶液については式(1)中の物質定数 K, n の実測例を表1^{(3),(4),(5)}に示す。表1より解るように測定条件が異なるためか、測定者により大きく異なっている。

最近の辻野氏ら⁽⁴⁾の成果により, HEC水溶液は,

$$\tau = \left\{ \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{(1 + \lambda |D|)^n} \right\} D \dots (2)$$

の形が極めて正確に表現されていることを明らかにしているが, 代表 **Reynolds** 数の表現の取扱い上多少不便なところから, ここでは式(1)のモデルを採用する.

従って採用した物質定数を使った式(1)と, 辻野氏らの式(2)の間で正しい剪断応力を換算する必要がある. 表1 *印の値を採用した場合の式(1)のべき乗則モデルと辻野氏らの実測値とのちがいを図1に示す. HEC水溶液の $\tau \sim D$ の非線形媒質の性質がよく現れている. この図より高剪断速度の領域では辻野氏らの実測値に文献(3)の値は合致するように思われる.

次に文献(3)より, 物質定数 K と n の関係を図2に示す. 文献(3)の実験条件ではHEC水溶液, PEC水溶液, CMC水溶液の濃度, 温度によらず一定の関係になるようである.

さらに, 辻野氏らの成果から判断すれば, 低い剪断速度領域では, みかけの粘度は一定値に近づき, 剪断応力 \sim 剪断速度の図1では **Log-Log** 座標系のグラフで傾き 45° の直線に近づくことから, 2%以下の濃度のHEC水溶液は低 **Reynolds** 数領域では **Newton** 流体の挙動を示す. このことより, 極めて低 **Reynolds** 数の流れでは **Newton** 流体の流量特性の値と一致することが推測される.

次に, ここで取り扱う非 **Newton** 流体の代表 **Reynolds** 数 Re_N を式(1)を用い, 文献(3)から次の形を定義する.

$$Re_N = \frac{\rho U^{2-n} L^n}{K} \dots (3)$$

ただし, 代表速度 U は, 絞りのど部断面平均速度, 代表長さ L は, 絞りのど部直径 d である. 絞り前後の圧力差 ΔP については, 流量係数 C_a を

$$C_a = U / \sqrt{2 \Delta P / \rho} \dots (4)$$

と, 定義する. (いわゆる圧力係数 $C_P = \Delta P / (\frac{1}{2} \rho U^2)$ とは $C_P = 1/C_a^2$ の関係となるから $C_a > 1$ となることもある.)

以下, 絞りの流動特性として, 上記の $C_a \sim Re$ の関係を求めた.

表1 物質定数

流 体	$K[\text{kgf} \cdot \text{s}^n/\text{m}^2]$	n	$T[\text{K}]$
2% HEC*	9.534	0.189	293
0.5% HEC*	0.086	0.5088	293
2% HEC**	0.204	0.60	293
2% HEC***	0.00114	0.379	301

* 文献(3), **文献(4),
***文献(5), より引用

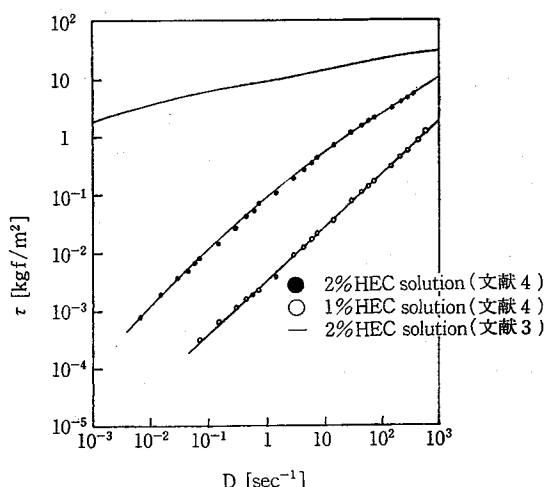
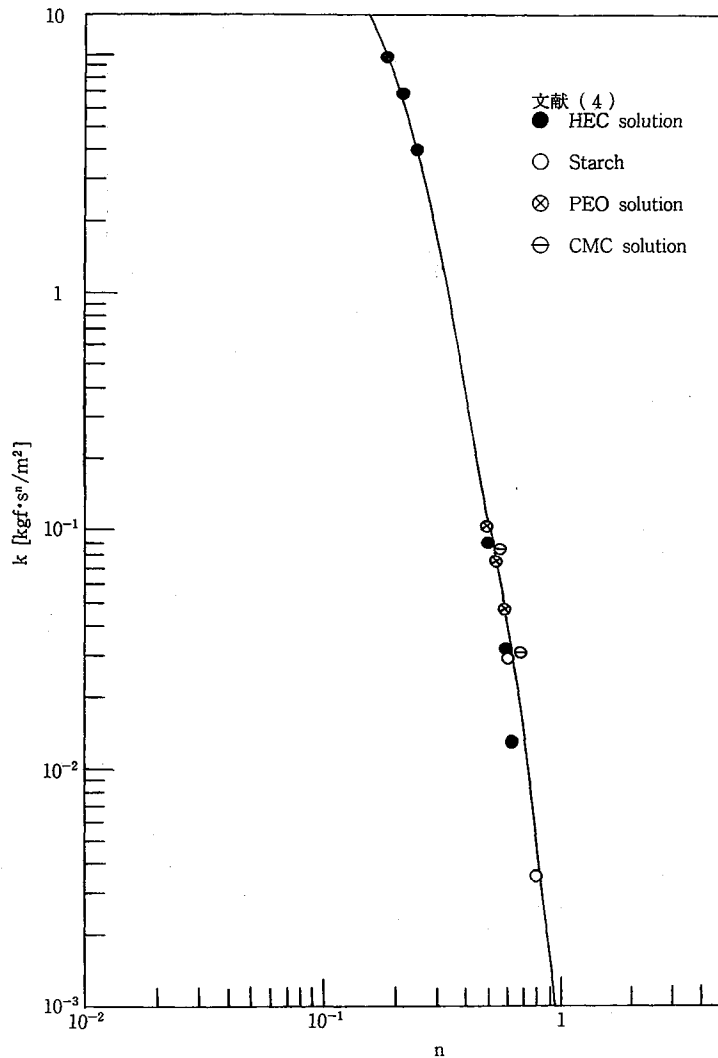


図1 HEC水溶液のモデルの違いによる剪断応力の相違

図2. 物質定数 K, n の関係 (文献(3)による)

3 実験装置と方法

HEC (和光紙薬工業) 水溶液の作成方法は化学天秤で重量を測定し、水に溶解した。溶解はガラス棒で攪拌し24時間放置した。重量濃度2%と0.5%を作製した。実験に使用したHEC水溶液の密度はボーマの比重計から実測し、表2に示す。また、辻野氏⁽⁶⁾らと比較したものを図3に示す。

温度293 Kで0.5% HEC水溶液、2% HEC水溶液で辻野氏らの値と一致したので、これらの値を以下使用した。

表2. HEC の 密度

	密度[kgw·s ² /m ⁴]	温度K
0.5% HEC 水溶液	102.24	293
2% HEC 水溶液	102.55	293

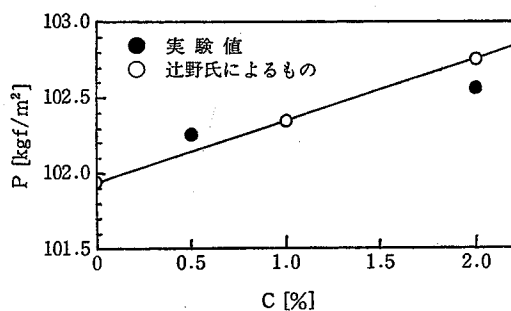


図3. HEC 水溶液の密度

次に実験装置の概要を図4に示す。絞り前後の上流・下流の条件は図4のように上流に 200mm, 下流に 335mm の直管を使い十分の助走域をとった。上流側の水槽は定常流とするようにオーバーフロータンクの下部側面からビニール管で直管に導いた。設定流量とするように下流 335mm のところでビニール製コックを取りつけ、適宜開閉して実験を行った。流量は下流側で容積法によって検定した。使用したポンプは TUTHILL PUMP COMPANY 製の9175型である。直管は内径 8 mm のガラス製である。

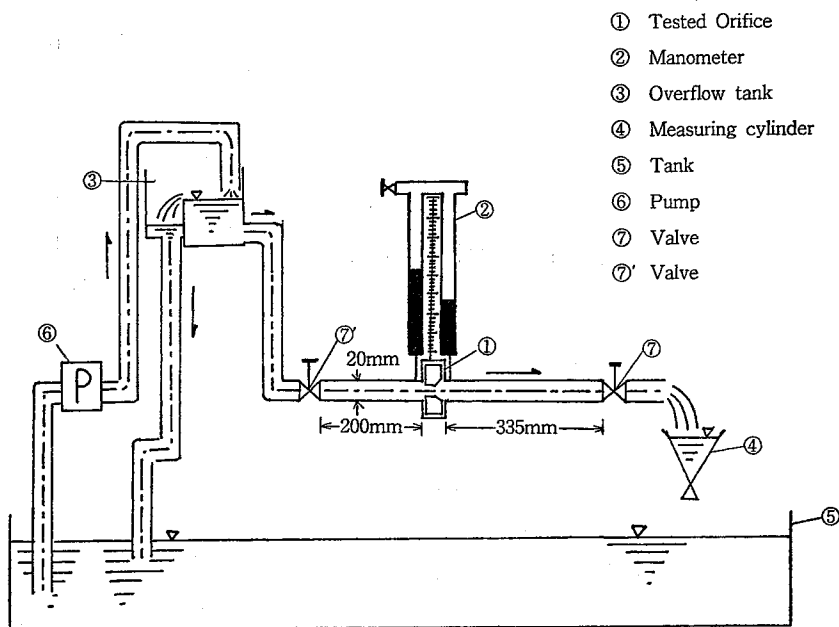


図4. 実験装置の概略図

試作オリフィスの寸法は図5に示す寸法でアクリル樹脂製である。図に示すように圧力タップは絞り前後 1.0mm の位置で直径 1.6mm の孔をあけ圧力マノメーターにとりだした。図5中の主要な寸法は $d=2.65\text{mm}$, $l=1.02\text{mm}$, $L=8.0\text{mm}$, $t_1, t_2=1.8\text{mm}$, $\theta=45^\circ$ である。

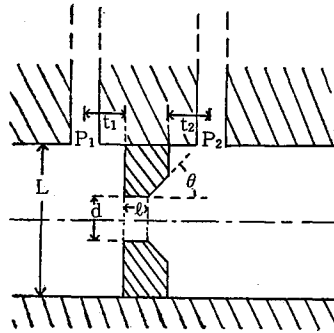


図5 試作オリフィスの寸法

4 実験結果と考察

以上の方法による試作オリフィスの流動特性について、まず流量 Q と差圧 ΔP の関係を図6に示す。図より、高 **Reynolds** 数領域(高速)での水、**HEC**水溶液共にほぼ同じ線上に近づいてはいるものの、2%**HEC**水溶液の方がたち上がりが大きく、抵抗が少ない傾向となっている。また0.5%**HEC**水溶液の場合、辻野氏⁽⁴⁾らの $\tau \sim D$ の関係がほぼ45°に近い傾向からも推論されるように、**Newton** 液体の性質に近く、絞りの流れでも水の場合とあまり変わらない。

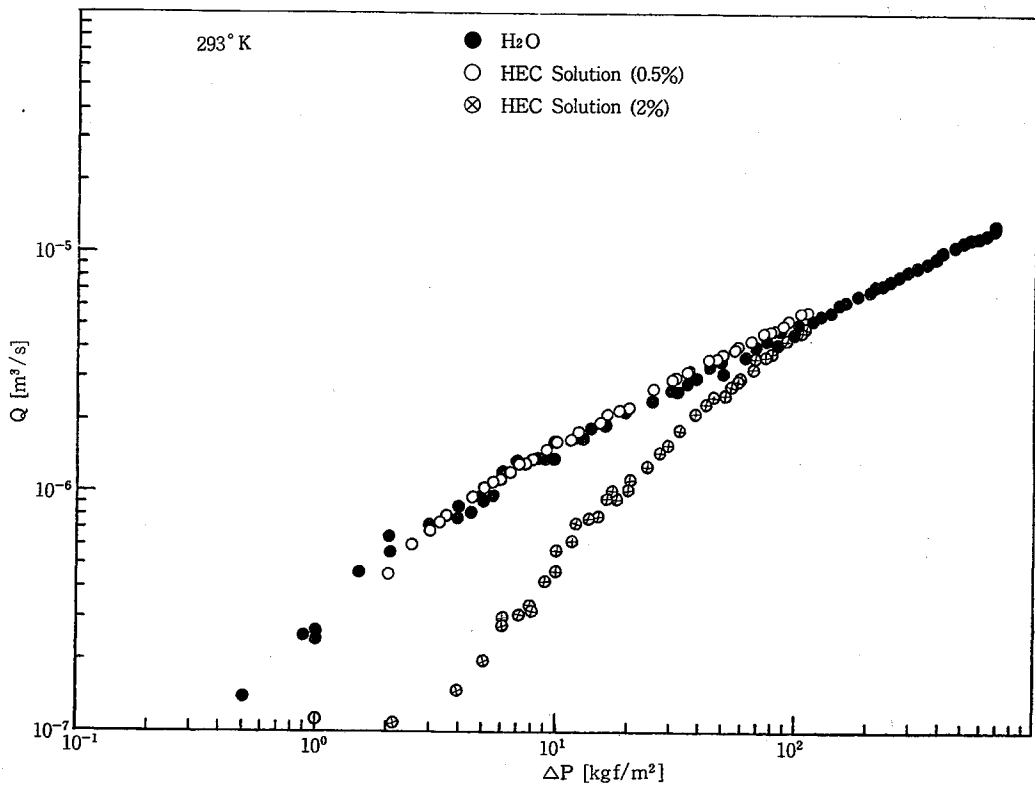


図6. オリフィスの流量と差圧の関係

次に辻野氏らの高剪断領域の $\tau \sim D$ の値をべき乗則近似で表現し、それから得られる物質定数 K, n を用いて式(3)によって流量係数 C_a と Reynolds 数 Re の関係を整理したのが図7の○印 ($2 \cong 2.04D^{0.6}$)、文献(3)の物質定数を用いたのが●印、文献(5)によるものが⊖印である。

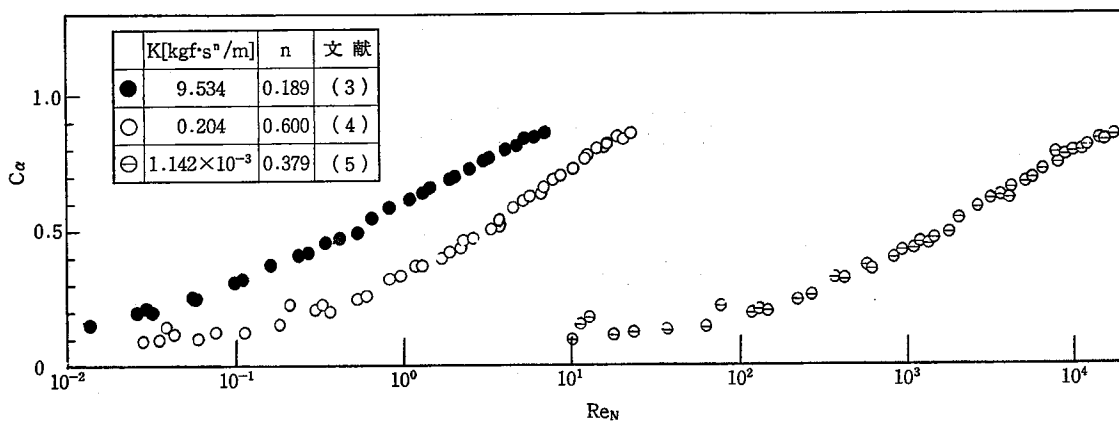


図7. 2%HECのべき乗則モデルの物性定数の違いによる流量係数と Reynolds 数の関係

水と0.5%HEC水溶液の C_a と Re の関係を示したのが図8, 図9である。いずれの物質定数を用いたべき乗則モデルの場合も Newton 流体(水)の流量係数の傾向と同じ傾向を示す。

物質定数の値の違いによって異なる曲線となるものの、高い Reynolds 数の領域で Newton 流体よりもHEC水溶液の方が高い流量係数を示す。このことは Bate⁽⁷⁾ がポリマー溶液を用いた結果と同じ傾向を示している。

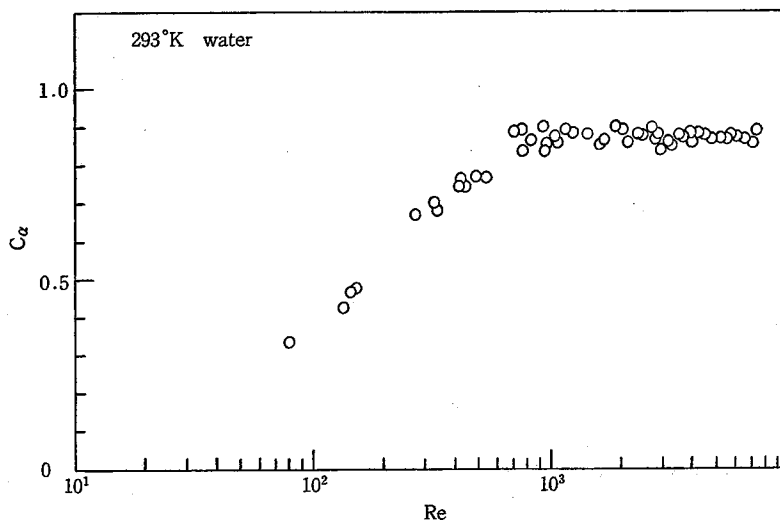


図8. 水の流量係数と Reynolds 数の関係

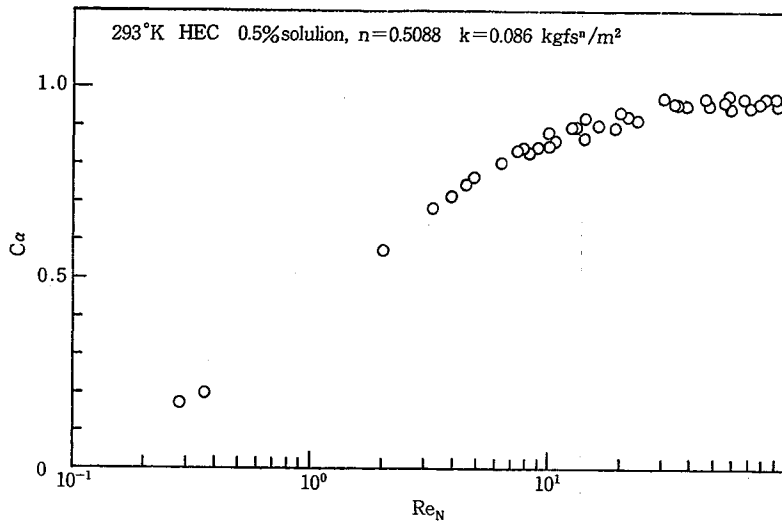


図 9. 0.5%HECの流量係数と Reynolds 数の関係

次に、上記の得られた $C_a \sim Re$ の諸関係から非 Newton 流体のべき乗則モデルの物質定数を求めることを考える。低 Reynolds 数領域で水と同じ流量係数となる点での文献(3), 文献(4), 文献(5)による物質定数を用いた Re_N をとり, Re_N と Re との関係を図10に示す。

$Re_N \sim Re$ の関係は物質定数によらず直線となるので、非 Newton 流体の Reynolds 数 Re_N は次式のようにおける。

$$Re_N = A \cdot Re^m$$

この式より、非 Newton 流体の Reynolds 数は水の場合の Reynolds 数に換算出来る。いいかえれば、

$$\begin{aligned} Re_N &= \frac{\rho U^{2-n} L^n}{K} = A \cdot Re^m \\ &= A \cdot \left(\frac{\rho U L}{\mu} \right)^m \\ &= A \cdot \frac{\rho^m U^m L^m}{\mu^m} \end{aligned}$$

であるので両辺の U のべき数, L のべき数を等しくとり、

$$2 - n = m, \quad n = m$$

が成立しなければならない。すなわち Newton 流体の性質の時には $m = n = 1$ でなければならない。実験値から、 $m = n = 1$ からずれる点から非 Newton 流体の性質を示しはじめる。図1の $\tau \sim D$ の関係からいえば、●印の曲線の直線からずれてくる $D = 10^2 (\text{sec}^{-1})$ から非 Newton 性を示すと推定される。

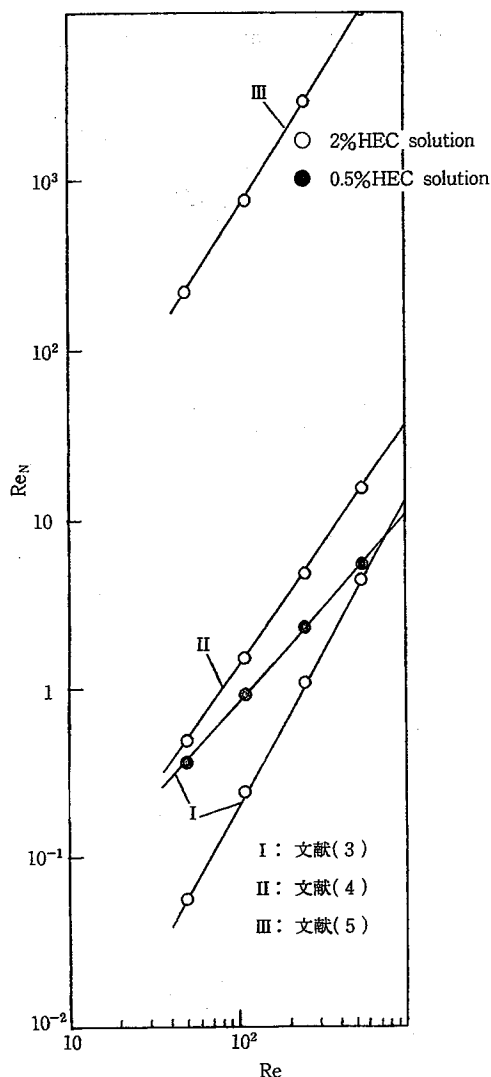


図10. 流量係数の等しい点での水の Reynolds 数と HEC の Reynolds 数の関係

5 結 論

HEC水溶液を用いた擬塑性流体の小口径絞りの流動特性を実験的に検討し、次の諸点を明らかにした。

- (1) 低 Reynolds 数ではHEC水溶液2%程度までの濃度ではべき乗則モデルで整理した、流量係数～Reynolds 数の傾向は Newton 流体の一般的傾向と同傾向を示す。
- (2) 高 Reynolds 数では既往の諸傾向と同様にここでも HEC 水溶液の方が水よりも流量係数が大きい値を示した。
- (3) 用いた物質定数のちがいが濃度によって流量係数が見掛け上異なった値となり、それらも抱括した統一的な Reynolds 数では整理できない。

- (4) 近似的なべき乗則モデルの物質定数 n について評価法を示し, $n < 1$ の範囲では非 **Newton** 性を示すことが推定された.

今後, 液体の種類ばかりでなく, 開口比や絞り形状の違い等, 検討すべきことは多い.

おわりに, 本研究をするに当り貴重な御助言と御指導をいただいた高知医科大学名誉教授 高知大学名誉教授上田寿先生に感謝の意を表する.

文 献

- (1) 富田 幸雄: 日本機械学会, 第809回講演論文集, No. 710—8 (1971), P. 125~128
- (2) 島 信行: 日本機械学会論文集, 49巻, 443号 (1983), 1356.
- (3) 日本機械学会編: 管路・ダクトの流体抵抗, 技術資料, (1980), P. 157~158
- (4) TSUJINO. T, SHIMA. A: *Rep. Inst. Highseep Mech.*, vol. 46, No. 361 (1983), P. 153~159
- (5) 小林 東和, 富田 幸雄: 日本機械学会論文集, 36巻, 287号, (1960), 1109.
- (6) TSUJINO. T, SHIMA. A: *Rep. Inst. Highseep Mech.*, vol. 46, No. 361 (1983), 163.
- (7) Bate, H.G: *Nature* vol. 216, (1967), 1100.

(高知女子大学 物理学研究室)